



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería de Materiales e
Ingeniería Química

TRABAJO DE FIN DE GRADO

CÁLCULO DE LA LÍNEA PIEZOMÉTRICA
DE UNA EDARU

Autor: Víctor Manuel de Paz Rueda

Tutor: Antonio Aznar Jiménez

Septiembre 2014



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi profesor y tutor D. Antonio Aznar Jiménez por la ayuda que me ha prestado para la realización de este proyecto, ya que sin su idea y sin sus conocimientos esto no habría sido posible.

Con este proyecto cierro una etapa en esta universidad pero se me abre otra nueva etapa por delante. Echando la vista atrás me doy cuenta de todas las cosas que he vivido desde el primer día que pisé en la universidad y todas las personas que he conocido. Sin duda me llevo grandes amigos que espero sean para toda la vida.

Creo que en este espacio merece ser mencionado mi amigo Arturo, creo que sin él no habría podido superar ese comienzo que se me hizo bastante complicado, pero mira, aquí estamos. Nuestros caminos en la universidad se separaron un día pero nuestra amistad creo que quedará para siempre.

En estos últimos años me he rodeado de otros amigos que me han apoyado y con los que creo que hemos formado un equipo que nos hemos ayudado para todas las asignaturas. Así, quizá, me haya resultado más fácil ir superándolas. Éstos son Fran, Miguel, Antonio y Alberto. Manu, Álvaro, Alfredo y Carla también han sido buenos compañeros y buenos amigos.

En lo personal, quiero agradecer en primer lugar el apoyo que me ha dado Estefanía, mi novia. Yo creo que no es el sitio para decirte todo lo que significas para mí. Gracias por ese apoyo incondicional en todos los aspectos, por confiar en mí y por creer que soy capaz de conseguir cualquier meta que me proponga. Desde que la conozco mis resultados académicos han sido mejores, ella ha tenido una gran parte de culpa. También ha sido la que estaba detrás de cada suspenso dándome ánimos y levantándome la autoestima. En segundo lugar quiero dar las gracias a mi primo Sergio, él ha sido el que mejor sabía como me sentía con cada examen y el esfuerzo que requiere cada uno de los aprobados. Su comprensión y apoyo han sido más que importantes para llegar hasta aquí.

Por supuesto mi padre, mi madre y mi hermano también han puesto su granito de arena para conseguir sacarme la carrera. Ellos son quienes me han formado como persona y quienes han hecho que yo sea quien soy y cómo soy hoy, y eso es algo mucho más importante que cualquier otra cosa.

Gracias a todos.



INDICE

0. RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 OBJETIVO	9
1.2 BASES DE PARTIDA	9
2. DESCRIPCIÓN DE UNA EDARU.....	10
2.1 DIFERENTES ETAPAS DE UNA EDARU:	11
2.1.1 Obra de llegada y elevación	11
2.1.2 Desbaste y tamizado	13
2.1.3 Desarenado y desengrasado.....	13
2.1.4 Decantación primaria.....	16
2.1.5 Sistema biológico y decantación secundaria.....	18
2.1.6 Salida del agua tratada.....	20
3. PROBLEMAS DE BOMBEO	21
3.1 ¿POR QUÉ NECESITAMOS BOMBEO EL AGUA?.....	21
3.2 CONCEPTO:.....	21
3.3 TIPOS DE BOMBAS.....	22
3.4 ACCESORIOS.....	23
3.5 TIPOS DE BOMBEO	23
4. CÁLCULO DEL BOMBEO DE AGUA	25
4.1 BOMBEO DE CABECERA DE PLANTA	25
4.1.1 INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE LAS BOMBAS DE CABECERA DE PLANTA.....	27
4.2 BOMBEO DE RECIRCULACIÓN.....	29
4.2.1 INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE LAS BOMBAS DE RECIRCULACIÓN INTERNA ...	30
5. ESTUDIO HIDRÁULICO. LÍNEA PIEZOMÉTRICA.....	32
5.1 CONCEPTO DE PÉRDIDA DE CARGA:.....	32
5.2 TIPOS DE PÉRDIDAS DE CARGA:	32
5.3 DEFINICIÓN DE LÍNEA PIEZOMÉTRICA.....	33
5.4 ESTUDIO HIDRÁULICO:.....	35
5.5 CRITERIOS DE CÁLCULO	36
5.6 CRITERIOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA LÍNEA PIEZOMÉTRICA (LP).....	41



6. CÁLCULO DE LA LÍNEA PIEZOMÉTRICA	42
6.1 CÁLCULOS HIDRÁULICOS	43
6.1.1 Pérdida de carga en equipos.	43
6.1.2 Pérdidas en conductos y tuberías.	48
 ANEXO 1: CÁLCULO BOMBEO	55
1. Cálculo del pozo de bombeo	55
2. Pozo bombeo cabecera de planta	56
3. Pozo bombeo recirculación	61
 ANEXO 2: CÁLCULOS ELÉCTRICOS	65
1. Cuadro eléctrico	65
2. Arrancador	65
3. Protecciones	66
4. Cálculo de los conductores y el neutro	67
5. Instalación eléctrica bombeo de cabecera	68
6. Instalación eléctrica bombeo recirculación	70
 CONCLUSIONES	73
 BIBLIOGRAFÍA	75



RESUMEN



0. RESUMEN

El principal propósito del proyecto es el estudio y cálculo de la línea piezométrica de una estación depuradora de aguas residuales (EDARU).

Una estación depuradora de aguas residuales tiene como meta transformar agua sucia en agua apta para el consumo, es decir, el reciclaje de agua usada procedente de los sistemas de alcantarillado, de vertidos industriales, de las viviendas de la población a la que sirve y de la misma lluvia.

Después del tratamiento al que se somete el agua para dotarla de condiciones sanitarias y ambientales aptas, ésta se devuelve a los efluentes naturales con unas características compatibles con la sostenibilidad del ecosistema.

Para lograr su objetivo, el agua pasa por diferentes procesos que consiguen eliminar las sustancias sólidas y líquidas que contiene. Para que el agua circule por toda la instalación de la manera que nosotros queremos, es necesario conseguir desplazar ese agua. Para ello dotamos a la estación depuradora de un sistema de impulsión por bombeo que envíe el agua desde el pozo de salida hasta la zona de vertido al effluente final.

En este proyecto realizaremos los cálculos de dimensionamiento del bombeo en cabecera de planta y de recirculación de fangos. Además, una vez elegidas las bombas que se van a utilizar, calcularemos el consumo eléctrico, así como los componentes electrónicos que vamos a requerir para el control y el funcionamiento de los equipos de bombeo.

Sin embargo, nos centraremos en el cálculo de la línea piezométrica, la cual se obtiene mediante la suma de las pérdidas de carga en los diferentes procesos, equipos y accesorios por los que pasa el agua a tratar y que forman la EDARU. La línea piezométrica será la referencia para la elección de las bombas.



SUMMARY

The main purpose of this project is the research and calculation of the hydraulic grade line of a urban wastewater plant.

The goal of an urban wastewater plant is to transform dirty water into suitable for consumption water, that is to say, to recycle previously used water coming from the sewage system, industrial discharges, houses of towns and the water from the rain.

After the treatment water is subjected to provide sanitary and environmental suitable conditions, it is delivered to the natural effluents with compatible properties with the ecosystem sustainability.

To reach its target, the water goes through different processes that manage to remove the solid and liquid substances that it contains. To make water flow throughout all the plant the way we want, it is necessary to displace it. To achieve that flow we need to provide the plant a pumping impulsion system which sends water from the output of pumping to the discharge out to the effluence.

In this project we will make the dimensioning calculation of the pumping system in the head of the plant and the pumping system of recirculation of mud. Moreover, once we have chosen which pumps to use, we will also calculate the power consumption, as well as all the electronic components that will be required for the control and operation of the pumping equipment.

However, we will focus the project on the calculation of the hydraulic grade line, obtained by adding all the load losses in the different processes, equipments and accessories where the water flows and that make up the wastewater plant. The hydraulic grade line will be important to choose the pump we will use.



MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO

El objetivo principal del proyecto, como he mencionado en el resumen, es el estudio de la pérdida de carga en una EDARU mediante la línea piezométrica.



Imagen de un vertido de aguas residuales incontrolado. Fuente:
http://almeria360.com/actualidad/27062012_gabriel-amat-muchos-pueblos-de-almeria-tiran-las-aguas-fecales-al-rio_28217.html

1.2 BASES DE PARTIDA

El proyecto se realiza bajo unos parámetros iniciales y especificaciones técnicas concretas de la empresa municipal de aguas y saneamiento de Murcia. Estos datos los podemos ver recogidos en la siguiente tabla:



Datos de partida	
Población	50000 habitantes
Dotación	250 l/hab día
Coeficiente Qmax	1,720
Concentración SS entrada	375 mg/l
Concentración DBO entrada	400 mg/l
Concentración SS salida	30 mg/l
Concentración DBO salida	23 mg/l

Datos de partida del estudio. Fuente: Empresa municipal de aguas y saneamiento de Murcia, 2014.

2. DESCRIPCIÓN DE UNA EDARU

Una Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas (EDARU), también llamada planta de depuración o planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) tiene como objetivo recoger las aguas negras o mezcladas, la lluvia, efluentes industriales, las aguas procedentes del alcantarillado y aplicarle unos tratamientos físicos, químicos, biológicos y tecnológicos para conseguir un agua de mejor calidad y características tomando como base ciertos parámetros normalizados.

En la mayoría de las estaciones depuradoras de aguas residuales se trata agua residual local, procedente del uso ciudadano, así como de la escorrentía superficial del drenaje de las zonas urbanizadas. También podemos encontrar EDARU que se diseñan y se utilizan exclusivamente para grandes empresas, con tratamiento único del agua residual allí generado.

El tipo de procesos que se pueden llevar a cabo varía notablemente de unas plantas a otras, principalmente en función del tamaño de la población a la que abastece dicha planta. Así en núcleos de baja población podemos encontrar sistemas de tratamiento por lagunaje, reactores biológicos, lechos de turba y en general los denominados tratamientos no convencionales o blandos, cuya principal característica es un coste reducido de mantenimiento.

Por otro lado, en los núcleos con niveles medios de población es habitual la instalación de sistemas de fangos activos por oxidación total. En este tipo de instalación se busca la simplificación, principalmente de la línea de tratamiento de fangos, lo que conlleva a la reducción de la cantidad y la cualificación de los operadores de la instalación.



2.1 DIFERENTES ETAPAS DE UNA EDARU:

- 2.1.1 Obra de llegada y elevación.
- 2.1.2 Desbaste y tamizado.
- 2.1.3 Desarenado y desengrasado.
- 2.1.4 Decantación primaria.
- 2.1.5 Tratamiento biológico y decantación secundaria.
- 2.1.6 Salida del agua tratada.

La línea de agua es considerada como todo el recorrido que realiza el fluido desde que entra en la planta hasta que sale como agua limpia.

2.1.1 Obra de llegada y elevación

Es la primera zona de tratamiento que nos encontraremos en una EDARU. Su función principal consiste en realizar un tratamiento previo del agua residual para eliminar los sólidos más gruesos así como los excedentes de arenas, que pueden dañar o estropear los equipos y máquinas de etapas posteriores. Además, en esta zona también se implanta el sistema de bombeo del agua residual, ya que los colectores de saneamiento suelen estar enterrados, y por lo tanto, a cotas inferiores de la cota de vertido final.

Estanque de tormentas:

En una estación depuradora es siempre necesario contar con servicios auxiliares que puedan asumir cualquier incremento de caudal en momentos puntuales, como por ejemplo las variaciones producidas por una tormenta o lluvias continuadas. Para hacer frente a estos sucesos, se cuenta con estanques de tormentas que almacenan agua para pasarla en un momento posterior a la alimentación de la planta. Otro sistema para tratar el exceso de caudal son los aliviaderos. Se trata de canalizaciones abiertas en las que se almacena agua hasta una altura máxima llamada lámina de agua. Cuando el agua llega a este punto rebosa y se vierte a una canalización auxiliar.

Pozo de gruesos:

Es frecuente la instalación de un pozo de gruesos a la entrada de la instalación. Aquí es donde se retienen los sólidos y las arenas más gruesas utilizando para ello un sistema de cucharas bivalvas. A la salida del pozo se encuentran unas rejillas que impiden el paso de los objetos voluminosos flotantes. Estos residuos son recogidos en contenedores como los utilizados para escombros (4-6 m³).



Rejas de protección del sistema de bombeo:

Para la protección de los equipos de bombeo de las estaciones EDARU se suelen instalar unas rejas manuales con el fin de retener y separar los cuerpos voluminosos flotantes y en suspensión que arrastra consigo el agua residual, y que podrían afectar gravemente al bombeo posterior. Estas rejas son conjuntos de barras dispuestas paralelamente entre ellas y colocadas perpendicularmente al flujo de agua o con un ángulo de inclinación para facilitar su limpieza.

La velocidad del agua debe ser superior a 0,3 m/s. Este sistema se instala entre el pozo de gruesos y la cámara de bombeo del agua residual.

Existen dos tipos de rejas:

- Rejas de gruesos.
- Rejas de finos.

Las rejas de gruesos, como su propio nombre indica sirven para eliminar los sólidos más grandes. Por consiguiente las rejas de finos se utilizan para recoger los sólidos de menor tamaño.

Bombeo de entrada:

La llegada de agua a la instalación se produce mediante colectores que suelen estar situados a cotas por debajo del terreno, por lo tanto es necesaria su elevación después de atravesar el pozo de gruesos.

Para que no sean necesarios bombeos posteriores, el bombeo de entrada se realiza hasta una altura suficiente como para que al final de todo el proceso, el agua tratada pueda verterse al nuevo cauce mediante gravedad.

Pero al ser éste un tema principal en el trabajo, lo trataremos en profundidad más adelante.



2.1.2 Desbaste y tamizado

El desbaste consiste en la separación de aquellos sólidos de tamaño elevado del agua residual que no han sido retenidos antes del sistema de bombeo, haciendo pasar el agua por rejas de medios seguidas de unas rejas de finos donde los materiales quedan retenidos.

Estos materiales son retirados de forma automática mediante cintas transportadoras, y enviadas directamente a contenedores, los cuales acaban en el vertedero municipal llevados allí por el sistema de recogida de basuras urbanas, ya que su composición es similar a las mismas.

2.1.3 Desarenado y desengrasado

Desarenado

En esta fase de la instalación se eliminan las arenas propiamente dichas pero también el 95% de las partículas de tamaño superior a 0,2 mm como cáscaras, grava, cenizas, etc. El destino final de estos residuos conocidos como arenas es el vertedero de inertes. Algunas veces se limpian estos residuos para reducir el contenido de materia orgánica.

Tipos de desarenadores:

- Desarenador longitudinal o estático

Consiste en la reducción de la velocidad del agua y de las turbulencias, permitiendo así que los sólidos en suspensión queden depositados en el fondo para facilitar su eliminación de forma manual. Se utilizan para caudales pequeños.

Normalmente se construyen dos estructuras en paralelo para que siempre se pueda contar con una de ellas mientras que la otra esta en procesos de limpieza.

- Desarenador de vórtice

Se basan en la formación de un vórtice (remolino) inducido de manera mecánica, de forma que quedan capturados los sólidos en la tolva central de un tanque circular. Hay fundamentalmente dos diseños diferentes: cámaras con fondo plano con abertura pequeña para recoger la arena y cámaras con un fondo inclinado y una abertura grande que lleva a la tolva. Según que el vórtice va distribuyendo los sólidos hacia el centro, unas paletas rotativas aumentan de velocidad para así levantar el material orgánico liviano y de esta forma retornarlo al flujo que pasa a través de la cámara de arena.



Desengrasado

Consiste en la eliminación de aceites, grasas, espumas y materias flotantes del agua. De esta forma se evita la aparición de organismos filamentosos en los sistemas biológicos. Para ello es necesario que los aceites y las grasas no estén solubilizadas.

Los desengrasadores pueden ser independientes del desarenador cuando se necesita un rendimiento muy elevado de eliminación de grasas.

Los desengrasadores se suelen diseñar conjuntamente con el desarenador aireado creándose una zona donde se acumulan las grasas, las cuales se extraen al final del canal a través de un vertedero o una compuerta.

Las grasas extraídas son concentradas por medio de un concentrador de grasas o desnatador, y, posteriormente, por medio de un tornillo de transporte son depositadas en un contenedor de almacenamiento.

Las grasas crean muchos problemas en la depuración de aguas residuales, especialmente en las rejillas de finos donde causan obstrucciones que aumentan los gastos de conservación, en los decantadores donde forman una capa superficial que dificulta la sedimentación al atraer hacia la superficie pequeñas partículas de materia orgánica y en la depuración por fangos activos. También perturban el proceso de digestión de lodos.

El sistema más comúnmente utilizado para la eliminación de grasas se lleva a cabo por insuflación de aire para desemulsionar las grasas permitiendo su ascenso a la superficie y su retirada. La velocidad ascensional de las burbujas de grasa puede estimarse entre 3 y 4 mm/s. Las grasas en superficie se retiran mediante rasquetas superficiales.



Imagen de desengrasado. Fuente:
<http://alojamientos.us.es/grupotar/master/formacion/edar/temario/pretratam/desengrasado.htm>

Las ventajas de combinar el desengrasado con el desarenado son las siguientes:

- Las velocidades de sedimentación de las arenas y de flotación de las partículas de grasa no se modifican prácticamente por realizar el desarenado y la desemulsión de grasas en el mismo depósito, lo cual es lógico si se considera la diferencia de densidades entre las partículas de arena y grasa.
- El aire comprimido añadido para el desengrasado ayuda a impedir la sedimentación de las partículas de fango poco densas, por lo que la arena depositada en el fondo del desarenador es más limpia.
- Las partículas de arena, al sedimentar, disminuyen las velocidades ascensionales de las partículas de grasa. Disponen así éstas de más tiempo para ponerse en contacto entre sí durante su recorrido hacia la superficie, aumentándose el rendimiento de la flotación de grasas.
- Otra ventaja es el ahorro de costes tanto en la construcción como en el mantenimiento de la planta.

Otras formas de llevarse a cabo el desengrasado son las siguientes:

- Tanques separadores de grasas: Consiste en un depósito en el que las grasas flotan en la superficie del agua que se elimina, mientras que por el fondo hay un flujo constante de agua desde el tanque.
- Separación de las grasas por balsas de decantación: Las grasas se retiran mediante la utilización de arquetas.



2.1.4 Decantación primaria

El objetivo de la decantación primaria es la eliminación de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual que no han sido eliminados en fases previas, así como la eliminación de la materia orgánica (DBO) del resto de sólidos por medio de la gravedad.

En este proceso se elimina el 65% de los sólidos en suspensión del agua residual de entrada. Como en la composición de dichos sólidos hay materia orgánica, su eliminación lleva asociada una reducción de la DBO de entrada de aproximadamente el 35%.

La decantación primaria consiste en una decantación física natural de los sólidos en suspensión y una flotación, también natural, de las partículas menos densas, los sólidos se depositan en el fondo, mientras que las partículas se retiran mediante rasquetas giratorias en superficie. El agua decantada se vierte en un canal que la conduce hacia el tratamiento biológico.

Los elementos fundamentales en todo decantador primario son:

- Arqueta de reparto: El caudal se divide entre los diferentes tanques mediante una arqueta de reparto situada entre ellos.
- Campana de reparto: es por donde entra el afluente. Deben proyectarse de tal forma que toda la corriente de alimentación se difunda homogéneamente por el tanque desde el primer momento. En los tanques circulares, el sistema de flujo es radial mientras que en los rectangulares el flujo es horizontal.



Imagen de decantación primaria. Fuente:

http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/9897/mod_resource/content/2/edar/temario/tratam1/decantacion.htm

- El puente decantador
- Deflectores: Suelen colocarse a la entrada y salida de la balsa. Sirven para conseguir una buena repartición del caudal afluente y para retener sustancias flotantes, grasas y espumas respectivamente.

- Vertedero de salida



Vertedero de salida decantación primaria. Fuente:
http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/9897/mod_resource/content/2/edar/temario/tratam1/decantacion.htm

2.1.5 Sistema biológico y decantación secundaria

Para la eliminación de la DBO no eliminada en la decantación primaria, el proceso utilizado de forma generalizada en este tipo de instalaciones es el de fangos o lodos activos en cualquiera de sus variantes.

Una vez eliminada la mayor parte de los sólidos sedimentables, el agua es llevada hasta los reactores biológicos para ser sometida a un proceso que persigue fundamentalmente la degradación de la materia orgánica por la acción de una serie de microorganismos.

La agitación evita sedimentos y homogeneiza la mezcla de los flóculos bacterianos con el agua residual. La aireación es necesaria para suministrar el oxígeno necesario tanto para las bacterias como para el resto de los microorganismos aerobios. El oxígeno puede provenir del aire, de un gas enriquecido en oxígeno o de oxígeno puro.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

El proceso de depuración se lleva a cabo por los microorganismos, que se desarrollan sobre la materia orgánica, y con la presencia requerida de nutrientes (nitrógeno y fósforo, así como otros oligoelementos).

Este proceso requiere una cantidad determinada de materia orgánica, ya que cantidades excesivas de estos compuestos orgánicos, metales pesados y/o sales pueden inhibirlo o destruirlo; y cantidades reducidas de nutrientes pueden no ser suficientes para mantener el proceso.

Este proceso biológico de fangos activos tiene lugar en dos cámaras separadas. La primera es un reactor biológico, donde tenemos un tanque agitado, aireado y con el agua residual. La segunda es un decantador secundario, que es donde se deposita el fango producido. También podemos ver este proceso desarrollándose en un único depósito, actuando como reactor y como decantador alternativamente.

Una vez estabilizado el proceso y con el fin de mantener la concentración de biomasa en el reactor, es necesario hacer una purga de los nuevos microorganismos creados.

El tiempo que se tarda en alcanzar una concentración de biomasa adecuada para obtener un rendimiento óptimo de operación es de 15-20 días.

Los tiempos de retención del agua en los reactores biológicos son próximos a cuatro horas, y por tratarse de grandes caudales, las balsas ocupan por lo tanto grandes volúmenes.



Ejemplo decantación secundaria. Fuente:

http://www.xabiaaldia.es/actualidad/como_funciona_la_depuradora-573.html

2.1.6 Salida del agua tratada

Cuando el agua ya está tratada y lista para volver al medio natural, ésta se envía a los ríos o al mar en función de la localización geográfica de la instalación. Se debe comprobar antes de nada que los niveles de contaminación estén controlados y que el vertido no supondrá ningún daño para el ecosistema.



Imagen de agua vertida depurada. Fuente:
http://editorial.cda.ulpgc.es/instalacion/7_OPTATIVAS/IHA/FOTOS/parque001.JPG



3. PROBLEMAS DE BOMBEO

3.1 ¿POR QUÉ NECESITAMOS BOMBLEAR EL AGUA?

Para el inicio de las etapas de la depuración es necesario la elevación de la línea de agua en la cabecera de la planta así como otro sistema de impulsión que recircule los fangos existentes en el decantador secundario hacia el primario para que la eliminación de nitrógeno sea la adecuada.

El sistema de bombeo de la línea de agua es fundamental en el proceso de depuración. Forma parte del pre-tratamiento, justo después de las rejillas de desbaste.

El bombeo se realiza desde un pozo de bombeo, cuya función es dar una cota de altura que permita que el desplazamiento del agua a tratar en las siguientes etapas de depuración se realice por gravedad. Si las condiciones topográficas son favorables, el bombeo se podría evitar.

En este apartado vamos a describir los principales problemas con los que nos encontramos a la hora de diseñar el bombeo de una estación depuradora de aguas residuales. Para ello, lo primero es explicar el concepto de bomba y sus diferentes tipos.

3.2 CONCEPTO:

Una bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y aporta al líquido que la atraviesa energía hidráulica. Se emplean para impulsar toda clase de líquidos: agua, aceites de lubricación, combustibles, ácidos, líquidos alimenticios, etc. También se emplean, como en nuestro caso, las bombas para bombear líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, fangos, desperdicios, etc.

Las bombas son los elementos que aportan la energía para vencer las pérdidas de carga y la diferencia de altura entre dos puntos y obligan a que el agua circule en un determinado sentido.

Las bombas deben dimensionarse para evitar fenómenos como la cavitación, que se produce cuando en algún punto la presión del fluido desciende por debajo de la presión de vapor y se forman burbujas que pueden provocar un mal funcionamiento de los equipos así como el deterioro de los elementos mecánicos.



3.3 TIPOS DE BOMBAS

Las bombas pueden ser rotodinámicas o de desplazamiento positivo.

- **Bombas rotodinámicas:** En este grupo están las bombas que son turbomáquinas o máquinas de corriente. Se caracterizan porque el fluido no está encerrado en una cámara, es decir, el fluido fluye. Su órgano transmisor se llama rodete. Se llaman rotodinámicas porque su movimiento es rotativo y la dirección de la corriente tiene un papel fundamental en la transmisión de la energía. Su funcionamiento consiste en incrementar la energía del fluido. Para ello, se incrementa la energía cinética recuperándose posteriormente en forma de presión.

Las bombas rotodinámicas pueden ser axiales, mixtas y radiales según sea la salida del flujo con respecto al eje. Las radiales son conocidas también como centrífugas y son las más utilizadas para la línea de agua de las EDARU. La altura de elevación de una bomba centrífuga depende fundamentalmente del caudal que circula por ella. Sin embargo, las bombas de impulsor axial son las más recomendadas para caudales grandes y alturas pequeñas. Además tienen limitación de paso de sólidos, con lo cual se hace imprescindible colocar previamente las rejillas de desbaste.

- **Bombas de desplazamiento positivo:** En este grupo se encuentran las bombas alternativas y las bombas rotoestáticas, las cuales siguen siendo rotativas y en ellas la dinámica de la corriente no es importante en la transmisión de la energía. Operan de forma volumétrica, es decir, desplazan un volumen por unidad de tiempo independientemente de la presión.

También puede suceder que se utilicen varias bombas. Las bombas pueden estar conectadas tanto en serie como en paralelo, proporcionando diferentes características según sea la conexión.

- **Conexión en serie:** En este tipo de conexión conseguimos sustituir la curva característica de las bombas por otra que se obtiene al sumar las alturas de las bombas individualmente. Este tipo de conexión se utiliza cuando es imposible alcanzar cierta altura con una sola bomba.
- **Conexión en paralelo:** Con este tipo de conexión conseguimos una curva característica en la que se suman los caudales para cada altura. Se utiliza la conexión en paralelo cuando tenemos una variación grande de caudal. En el momento de elegir el tipo de bomba es necesario que sean prácticamente iguales para evitar problemas y que alguna de ellas trabaje sin caudal.



3.4 ACCESORIOS

Un sistema de bombeo necesita además de las tuberías que enlazan los puntos de origen y destino, algunos elementos que aportan la energía potencial necesaria para el transporte, así como válvulas y equipos de medida.

- Válvula de compuerta: Son puestas en marcha mediante la acción de un tornillo. El mecanismo consiste en que cuando están abiertas, el conducto lo dejan libre, por lo que se consigue reducir considerablemente las pérdidas. Su uso no es el de regular, es decir, sólo hay dos posiciones: totalmente abiertas o totalmente cerradas.
- Válvulas de mariposa: Tienen en su interior un disco que gira 90°. Su uso está muy extendido porque son de muy fácil accionamiento y ocupan poco espacio. Como inconveniente cabe destacar que el disco que se encuentra en el interior de la válvula puede atascarse cuando pasen a través de él fluidos con sólidos. Son efectivas haciendo la función de válvula de cierre o de regulación y su pérdida de carga cuando están abiertas es muy pequeña.
- Válvulas antirretorno: Como su propio nombre indica, se utilizan para evitar el flujo inverso por las tuberías o para evitar que no se vacíe la tubería de aspiración de las bombas cuando éstas se encuentran paradas.

3.5 TIPOS DE BOMBEO

- Bombeo cabecera de planta

El pozo de bombeo se sitúa generalmente antes del proceso de desbaste y es donde se encuentran las bombas necesarias para la impulsión del agua residual.

La función del pozo de bombeo es la de proporcionar una cota de altura suficiente para que el agua discurra por la línea por gravedad hasta el punto de salida de la planta. Según datos de la EDARU de Linares el bombeo debe garantizar una velocidad mínima del fluido de 0.3 m/s para evitar que se depositen sólidos en el fondo de las tuberías y conducciones.

En la cabecera de la planta, las bombas deben ser centrífugas, pudiendo ser sumergibles o no sumergibles.



El pozo de bombeo está formado por:

- Cámara de aspiración: es de donde toma el agua el pozo de bombeo.
- Conductos de aspiración: Son las tuberías que conectan el pozo con el siguiente proceso.
- Bombas

- Bombeo de recirculación

El pozo de bombeo para la recirculación está a la salida del decantador secundario. El bombeo, al igual que en el de cabecera, debe garantizar una velocidad de flujo de 0.3 m/s para evitar que se depositen sólidos en el fondo de las tuberías y conducciones.

El pozo de bombeo, al igual que el pozo de bombeo de cabecera, está formado por:

- Cámara de aspiración: es de donde toma el agua el pozo de bombeo.
- Conductos de aspiración: Son las tuberías que conectan el pozo con el siguiente proceso.
- Bombas



4. CÁLCULO DEL BOMBEO DE AGUA

4.1 BOMBEO DE CABECERA DE PLANTA

En este apartado vamos a describir los caudales de diseño para los que se debe calcular el bombeo de cabecera de la planta, así como el número de bombas de cabecera de planta que son necesarias en función del caudal.

Lo ideal es que la velocidad del fluido sea de 1 m/s.

En la siguiente tabla podemos ver los caudales de diseño para los que se debe calcular bombeo de cabecera:

Caudales para el diseño	
Qmed	10000 m^3/h
Qmed horario	417 m^3/h
Qmin	209 m^3/h
Qmax	718 m^3/h

Tabla caudales de diseño. Fuente propia

Es importante destacar que siempre consideraremos para los cálculos de dimensionamiento de las bombas que el caudal a utilizar es el caudal máximo.

Existen varias marcas de bombas en el mercado adaptadas para plantas de tratamiento de aguas, pero en este trabajo se ha optado por utilizar unas de la marca Ebara. El motivo de la elección es la información facilitada por dicha empresa ya que es la que más datos nos ha proporcionado. Esta empresa ha realizado trabajos en grupos de presión en numerosas EDAR, por lo tanto cuenta con bastante experiencia en este campo.

Para el bombeo de cabecera se utiliza en concreto el modelo DML de esta marca. Cuenta con impulsor monocanal específico para el impulso del bombeo de aguas residuales. El motivo de la elección es que la altura manométrica que es capaz de elevar, se asemeja a la altura calculada en la línea piezométrica. La manera de instalarlas es poniendo 4 unidades en paralelo y siempre manteniendo una de reserva. Las bombas son centrífuga sumergibles con unos valores nominales de 270 m^3/h y 5,4 m de impulsión que son los necesarios para, según lo obtenido en la línea piezométrica, elevar el agua bruta, que son 718 m^3/h y de 3,741 m. Se necesitan al menos 3 bombas en funcionamiento en el



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

caso de caudal máximo, pero para optimizar el rendimiento de la instalación optamos por la incorporación de una bomba adicional, lo que suman 4 bombas en total.

Según los datos que hemos podido obtener del fabricante, ésta bomba trabaja superando el 65% de rendimiento en el margen de impulsión de 1800-3200 l/min, que es equivalente a 108-192 m^3/h . Pudiendo alcanzarse el 68% en el caso de encontrarse funcionando con una impulsión de 2400 l/min equivalentes a 144 m^3/h .

En la siguiente tabla podemos ver el las posibles configuraciones de las bombas.

	Qmax (718 m^3/h)		Qmed (417 m^3/h)		Qmin (209 m^3/h)	
Bombas conectadas	Q por bomba (m^3/h)	η (%)	Q por bomba (m^3/h)	η (%)	Q por bomba (m^3/h)	η (%)
2 bombas	359	0	208,5	62	104,5	65
3 bombas	239	62,5	139	67	69,66	55
4 bombas	179,5	67	104,25	64	52,25	0

Número de bombas en función del caudal. Fuente EBARA, 2014



Bomba EBARA DML monocanal. Fuente: EBARA



En la tabla podemos observar que para trabajar con caudal máximo lo mejor es utilizar 4 bombas. Por otra parte, para el funcionamiento a caudal medio y caudal mínimo es recomendable el uso de 3 y 2 bombas respectivamente.

Los valores del pozo de bombeo se resumen en los siguientes cálculos obtenidos en el anexo:

- Caudal: $Q = 718 \text{ m}^3/h \rightarrow 199,4 \text{ l/s}$
- Volumen del pozo de bombeo: $22,43 \text{ m}^3$
- Sumergencia de aspiración: $0,33 \text{ m}$
- Superficie mínima del pozo: $18,24 \text{ m}^2$
- Bombas: 4 bombas del tipo 150 DML 511 más una de reserva.

4.1.1 INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE LAS BOMBAS DE CABECERA DE PLANTA

Esta instalación se basará en el reglamento eléctrico de baja tensión y en las especificaciones técnicas de EMUASA. En este apartado solamente tendremos como objeto de cálculo la instalación eléctrica de conexión y control de las bombas.

En el anexo se encuentran las especificaciones y cálculos que podemos resumir en lo siguiente:

Las bombas que hemos instalado corresponden a 11 kW y 15 cv por bomba según el fabricante. La conexión de cada bomba es trifásica de 380 V y se llegan a alcanzar los $23,8 \text{ A}$ de intensidad máxima absorbida por bomba.

Es fundamental la utilización, para cada bomba, de un magnetotérmico de protección para prevenir posibles sobrecorrientes. Los que se utilizarán son de la casa EPP, el modelo C 20°, 4P, 10 kA .

Las bombas son controladas a través de unos cuadros suministrados por el fabricante y en este caso se emplean dos cuadros encargados cada uno de dos bombas. Tenemos en cuenta otro cuadro adicional para la bomba de reserva de iguales características pero que sólo controla una bomba.



Cuadros de control EBARA. Fuente EBARA.

Todas las instalaciones y elementos de protección se encontrarán dentro de los cuadros de control de motores (CCM's), los cuales se instalarán en distintos lugares de los edificios de proceso. Éstos a su vez estarán conectados al cuadro general de baja tensión, que nunca se encontrará en el interior de un edificio de proceso.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los cálculos del anexo:

Acometida individual del CCM hasta cada bomba	
Potencia de cada bomba	11 kW
Magnetotérmico protección bomba	C20A,4P,10kA
Intensidad máxima admisible	18,67 A
Sección de cable mínimo	6 mm ²
Sección de cable neutro	6 mm ²
Acometida de llegada mínima al CCM en función del bombeo	
Potencia total instalada	44 kW
Intensidad máxima admisible	104,5 A
Sección de cable mínimo	25 mm ²
Sección de cable neutro	16 mm ²

Resumen dimensionamiento eléctrico bombeo cabecera. Fuente propia



4.2 BOMBEO DE RECIRCULACIÓN

Este bombeo tiene lugar a la salida del decantador secundario.

Se tiene que cumplir, al igual que en el bombeo de cabecera, que la velocidad del fluido sea superior a 0,3 m/s para evitar que los sólidos se queden depositados en las tuberías y conducciones. Lo ideal es, que al igual que en el bombeo de cabecera, las bombas aporten una velocidad de 1 m/s.

En esta parte, las bombas pueden ser sumergibles o no sumergibles, pero siempre han de ser centrífugas, según las especificaciones de EMUASA. Las especificaciones son similares a las del apartado anterior: bombeo de cabecera.

El caudal de bombeo es $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ por línea, lo que equivale a $359 \text{ m}^3/\text{h}$

Por seguridad, la altura útil de bombeo la tomaremos como 2,5 m.

Para la impulsión de recirculación se ajusta el modelo de la bomba igual que hemos hecho con el de cabecera, es decir, según la altura necesaria calculada en el tramo de recirculación. En este caso a partir de los datos calculados de $Q_{\text{max}} = 359 \text{ m}^3/\text{s}$ y altura de 2,5 metros, el fabricante nos aporta dos posibles modelos de bombas a escoger: el modelo 150 DML 57,5 y el modelo 150 DML 55,5.

Elegimos el modelo 150 DML 57,5 ya que según las especificaciones del fabricante, trabajando a caudal medio, una sola bomba es capaz de impulsar los $209 \text{ m}^3/\text{h}$ requeridos. Para la instalación tomamos 3 bombas sumergibles de este modelo y una de reserva conectadas, igualmente, en paralelo.

Estas bombas trabajan a un rendimiento superior al 65% entre los márgenes de impulsión de 1100-1300 l/min que equivalen a $66-180 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. Pudiendo alcanzarse el 72% con 2200 l/min que equivalen a $132 \text{ m}^3/\text{h}$

En la siguiente tabla podemos ver las posibles configuraciones de las bombas:

	Qmax ($718 \text{ m}^3/\text{h}$)		Qmed ($417 \text{ m}^3/\text{h}$)		Qmin ($209 \text{ m}^3/\text{h}$)	
Bombas conectadas	Q por bomba (m^3/h)	η (%)	Q por bomba (m^3/h)	η (%)	Q por bomba (m^3/h)	η (%)
1 bomba	359	0	209	58	105	70
2 bombas	179,5	65	104,5	69	52,5	0
3 bombas	120	71	69,66	67	35	0

Número de bombas en función del caudal. Fuente EBARA, 2014



Como podemos ver en la tabla, para trabajar a caudal máximo es mejor la conexión con 3 bombas, para el caudal medio 2 bombas y para el caudal mínimo tan solo una bomba es necesaria.

El cálculo del pozo de bombeo de recirculación se resume en los siguientes datos obtenidos en el anexo:

- Caudal por línea: $Q = 359 \text{ m}^3/h \rightarrow 99,7 \text{ l/s}$
- Volumen del pozo de bombeo: $11,21 \text{ m}^3$
- Sumergencia de aspiración: 0,30m
- Superficie mínima del pozo: $9,11 \text{ m}^2$
- Dos bombas del tipo 150 DML 57,5 más una de reserva.

4.2.1 INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE LAS BOMBAS DE RECIRCULACIÓN INTERNA

Las bombas instaladas consumen, según los datos aportados por el fabricante, 7,5 kW y tienen 10 cv de potencia. La conexión de cada bomba es trifásica 380 V y la intensidad máxima absorbida es de 12,6 A por bomba.

Utilizamos para cada bomba el magnetotérmico C 16 A, 4P, 10 kA de la marca EPP.

Estas bombas se controlan por dos cuadros: Uno de ellos controla dos bombas mientras que el otro controla una sola bomba: Debemos tener en cuenta la necesidad de otro cuadro independiente para la bomba de reserva con características similares a los anteriores.

Los controles eléctricos de funcionamiento de las bombas de recirculación se encontrarán en la sala de control de motores (CCM's) que a su vez estará conectada al cuadro general de baja tensión de la planta.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

En la siguiente tabla podemos ver un resumen de los cálculos eléctricos que hemos hecho en el anexo:

Acometida individual del CCM hasta cada bomba	
Potencia de cada bomba	7,5 kW
Magnetotérmico protección bomba	C16A,4P,10kA
Intensidad máxima admisible	13,40 A
Sección de cable mínimo	6 mm ²
Sección de cable neutro	6 mm ²
Acometida de llegada mínima al CCM en función del bombeo	
Potencia total instalada	22,5 kW
Intensidad máxima admisible	40,21 A
Sección de cable mínimo	10 mm ²
Sección de cable neutro	10 mm ²

Resumen dimensionamiento eléctrico bombeo recirculación. Fuente propia



5. ESTUDIO HIDRÁULICO. LÍNEA PIEZOMÉTRICA.

Para entender el concepto de línea piezométrica primero debemos entender lo que significa el concepto de pérdida de carga:

5.1 CONCEPTO DE PÉRDIDA DE CARGA:

Un principio elemental de la física establece que en toda transformación energética existe una degradación, es decir, los rozamientos convierten en calor parte de la energía transformada, por lo que el miembro de la derecha (si la transformación se efectúa de izquierda a derecha, es decir, desde 1 hasta 2) se verá disminuido. Para que la igualdad se mantenga, la ecuación deberá quedar:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2}$$

El término h_{1-2} representa las pérdidas de energía que se producen en la transformación, se expresa también en m.c.a. (metro columna de agua) y se conoce como pérdida de carga.

5.2 TIPOS DE PÉRDIDAS DE CARGA:

- **Pérdidas de carga continuas o por rozamiento (h_c):** Se deben a la viscosidad del líquido y se producen a lo largo de toda la conducción. Suelen expresarse como producto de la pérdida de carga unitaria (J) y la longitud del tramo considerado (L). La representación gráfica de h_c en función de la longitud L sería una recta de pendiente J .

$$h_c = J \cdot L$$

La pérdida de carga por unidad de longitud depende de la rugosidad de la tubería, de su diámetro, del caudal que circula por ella y de su velocidad.

- **Pérdidas de carga locales, accidentales o singulares (h_s):** Están producidas por perturbaciones de la corriente líquida en puntos concretos, como derivaciones, válvulas, cambios de sección, etc.

La pérdida de carga total en una conducción será la suma de las dos:

$$h_T = h_C + h_S$$

5.3 DEFINICIÓN DE LÍNEA PIEZOMÉTRICA.

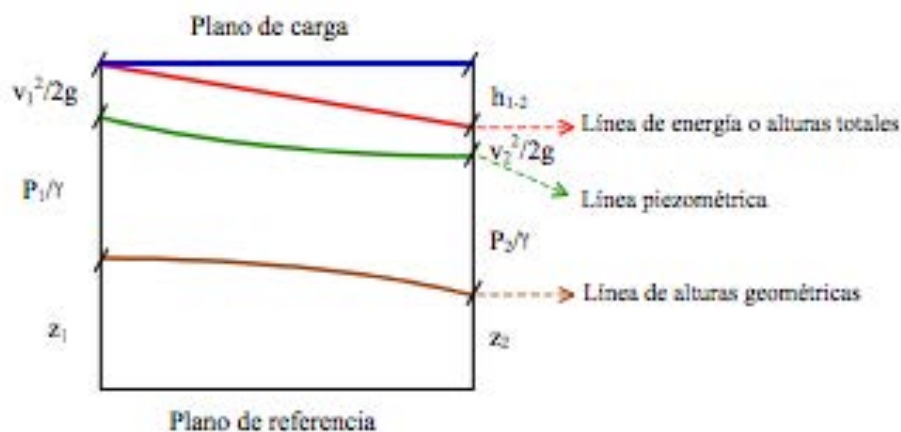
Línea piezométrica: Es la línea imaginaria que resultaría al unir los puntos hasta los que el líquido podría ascender si se insertasen tubitos piezométricos en distintos lugares a lo largo de la tubería o canal abierto. Es una medida de la presión hidrostática disponible en dichos puntos. La línea piezométrica por su propia definición no siempre es decreciente, pudiendo crecer en puntos en los que aumente la presión hidrostática.

Para el estudio de una línea piezométrica se llevan a cabo los cálculos hidráulicos que determinan la disposición y el dimensionamiento interno de los diferentes elementos y obras que componen una EDARU.

El estudio hidráulico para obtener la línea piezométrica, se realiza sobre la base de formas específicas para cada accidente hidráulico, adoptando márgenes de seguridad que garanticen el buen funcionamiento.

El proceso de cálculo se debe basar en el análisis del comportamiento hidráulico de los distintos elementos que componen la planta depuradora, relacionándose unos con otros mediante la distintas láminas de agua a la entrada y salida de los mismos.

Todas las cotas de lámina de agua se expresan normalmente en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y las pérdidas de carga, en metros de columna de agua (m.c.a.).





Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

La trayectoria de la tubería define la línea de alturas geométricas, que corresponde en cada punto a la cota z del eje longitudinal de la tubería referido a un plano de referencia.

La línea piezométrica (LP) es la suma de las alturas de presión y de posición, y se determina uniendo los puntos que alcanzaría el fluido circulante en distintos piezómetros conectados a lo largo de la tubería.

La línea de alturas totales se obtiene sumando para cada punto de la tubería las cotas piezométricas y las alturas de velocidad, y representa la energía total del fluido.

La línea de alturas totales se emplea en raras ocasiones por la poca importancia del término $\frac{v^2}{2g}$ frente a los demás. Normalmente, en la práctica, suele despreciarse, y se supone que el montante energético en un punto de la conducción viene dado por la línea de alturas piezométricas. Esto se justifica por ser las velocidades normales en una conducción las comprendidas entre 0.5 y 2.5 m/s, que elevadas al cuadrado y divididas por $2g$ supone entre 0.01 y 0.3 m.c.a., frente a la presión de decenas de metros que acostumbran a tener las redes. Además, los levantamientos topográficos no suelen tener una precisión superior los ± 0.5 m.

Por todo ello y como regla general, los pocos centímetros de la energía cinética son del todo despreciables, quedando las líneas de energía como se indica en la siguiente figura. En este caso, el plano de carga coincide con la línea de presiones estáticas, que es la línea que une las presiones a lo largo de la tubería cuando el fluido no está en movimiento.

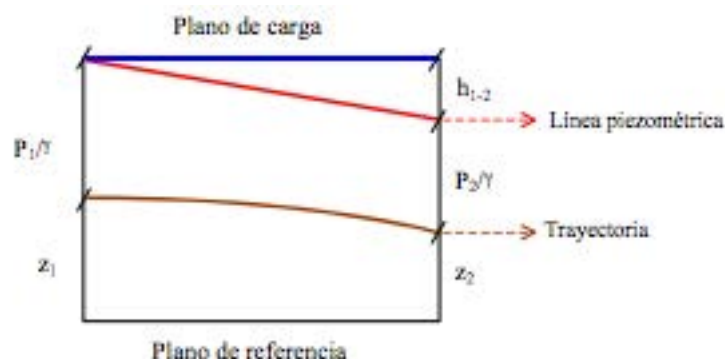


Imagen teoría línea piezométrica. Fuente: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema3.pdf



5.4 ESTUDIO HIDRÁULICO:

Vamos a partir de una estación que sirva para depurar el agua de un municipio de alrededor de 50000 habitantes.

Se hace muy necesario este estudio para conseguir el primer objetivo, que no es otro que lograr que la línea de agua pueda mantener una presión por gravedad. En este estudio tomaremos como datos el caso más desfavorable, que es aquel en el que el caudal sea el máximo posible.

El cálculo se centra fundamentalmente en los puntos donde se producen pérdidas de carga, esto es en los distintos equipos de la planta y en los elementos de conexión, como pueden ser las tuberías.

La finalidad de este estudio es conseguir contrarrestar las posibles pérdidas de carga de la línea mediante el diseño de un sistema de bombeo que sea capaz de proporcionar suficiente presión por gravedad. Por otro lado, éstas bombas han de ser capaces también de dotar al fluido una velocidad superior a 0,3 m/s para evitar que los sólidos arrastrados se depositen a lo largo de las tuberías.

Para que los procesos sean homogéneos, es importante que las líneas de la estación tengan el mismo caudal. Según CEDEX, el número de líneas de tratamiento varía de la siguiente manera:

Recomendaciones del CEDEX para establecer el número de líneas de tratamiento				
Carácter de estacionalidad	Población de diseño en habitantes equivalentes			
	< 10000	10000 - 20000	20000 - 50000	> 50000
Población estable	1 línea	1 línea	2 líneas iguales	> 2 líneas iguales
Población estacional	1 línea	2 líneas iguales	2 líneas iguales	> 3 líneas iguales

Número de líneas en función de la población. Fuente propia.

En este caso, al ser una EDARU para una población en torno a 50000 habitantes, se necesitan 2 líneas iguales.



5.5 CRITERIOS DE CÁLCULO

- Perdida de carga en los equipos.

En la siguiente tabla se muestran las pérdidas medias de cada unidad de tratamiento que se encuentran tabuladas en los apuntes del profesor Antonio Aznar. A estas pérdidas hay que sumar las ocasionadas por el sistema de vertido de aguas en algunos de los equipos.

Unidad de tratamiento	Intervalo de pérdida de carga (m)
Tamiz filtrante	0,01-0,04
Desarenador aireado	0,45-1,20
Decantación primaria	0,45-0,90
Decantación secundaria	0,45-0,90
Tanque de cloración	0,20-1,80

Resumen pérdidas de carga. Aznar, 2014.

- Pérdida de carga en tuberías.

Para el análisis de la pérdida de carga en tuberías se usa la expresión propuesta por Colebrook, universalmente aceptada para el cálculo de pérdidas de carga en tuberías de presión por las que circula agua en régimen de transición o turbulento. La dificultad de la determinación de la pérdida de carga obliga al uso de tablas o bien a la resolución numérica de dicha ecuación para los valores concretos de rugosidad, velocidad y diámetro de la tubería.

$$V = -2 \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t} \cdot \log \left(\frac{K}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot n}{D \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t}} \right)$$



En donde:

K : rugosidad equivalente (m)

n : viscosidad cinemática (m^2/s)

v: velocidad media del fluido en la tubería.

g: gravedad. (m/s^2)

D: diámetro de la tubería.

La pérdida de carga viene dada por la siguiente expresión (pérdida de carga unitaria según Darcy):

$$j = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

En donde:

j : pérdida de carga (m.c.a./m)

λ : coeficiente de pérdida de carga adimensional

D : diámetro de la tubería (m)

V : velocidad media del fluido en la tubería (m/s)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

El coeficiente de pérdida de carga adimensional se obtiene de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t} \cdot \log \left(\frac{K}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot n}{D \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t}} \right)$$

Para un caudal y sección determinada se obtiene el valor de la pérdida de carga en m.c.a./m de tubería. Esta expresión se resuelve numéricamente para la determinación del valor de j.



Los datos necesarios de rugosidad absoluta se recogen en la siguiente tabla:

Material	Rugosidad absoluta (mm)
Acero blindado	0,9-9
Acero comercial	0,45
Acero galvanizado	0,15
CCP	0,12
Hierro forjado	0,06
Hierro fundido	0,15
Hierro dúctil	0,25
Hierro galvanizado	0,15
GRP	0,03
Polietileno	0,007
PVC	0,0015

Tabla de rugosidades absolutas. Fuente:<http://www.siafa.com.ar/notas/nota181/fugas.htm>

- Pérdida de carga en accesorios.

La pérdida de carga genérica en una singularidad o también llamado accesorios, viene dada por la siguiente expresión, en donde K adopta distintos valores según el accidente:

$$h_a = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

En donde:

h : pérdida de carga (m.c.a.)

V : velocidad media del fluido en la tubería (m/s)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

K : coeficiente de la singularidad



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

Los valores de K para distintas singularidades adoptan valores dentro de los siguientes rangos:

Accidente	K
Contracción brusca	0,5-1,5
Expansión brusca	0,5-1,1
Codos a 45°	0,15-0,19
Codos a 90°	0,26-0,33
Válvula de compuerta	0,15-0,3
Válvula de retención	1,5-2,9
Compuerta canal abierto	0,2-0,3

Tabla coeficiente resistencia. Fuente:

http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/C%C3%A1lculos_hidr%C3%A1ulicos

- Criterios de dimensionamiento de vertederos.

En la mayoría de los casos, para este tipo de aplicaciones se diseñan los vertederos como vertederos libres, es decir, que la altura de la lámina de agua, aguas abajo del mismo es inferior a 2/3 de la altura aguas arriba. Se restringe este apartado a los tipos de vertederos más comúnmente empleados en plantas depuradoras: vertedero frontal para la mayoría de recintos y vertedero circular de dientes (vertedero Thompson) para recintos de planta circular.

$$\text{Vertedero frontal } Q = 1.9 * L * h^{3/2}$$

Q: Caudal que atraviesa el pozo

L: Longitud del vertedero.

h: altura de la lámina de agua aguas arriba.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

Vertedero Thompson $Q = 1.84 * L * h^{3/2}$

Q: Caudal unitario de cada diente.

L: Longitud del vertedero.

H: Altura de la lámina de agua aguas arriba.



5.6 CRITERIOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA LÍNEA PIEZOMÉTRICA (LP).

En este proyecto no vamos a representar de forma gráfica la línea piezométrica, pero a modo de curiosidad, para poder hacerlo hay que tener en cuenta las siguientes pautas:

- En el caso de pérdidas localizadas, como las que se producen en válvulas, codos, etc., la línea de alturas piezométricas sufre un descenso puntual igual a la pérdida de carga local.
- Si hay instalada una bomba (que comunica energía al fluido), la LP aumentará en ese punto en un valor igual a la altura de presión que la bomba esté proporcionando en ese instante.
- Si en algún caso la presión en el interior de la tubería es inferior a la atmosférica (presión manométrica negativa), la LP irá por debajo de la línea de alturas geométricas, ya que $\frac{P}{\gamma}$ será negativo. Si $\frac{P}{\gamma}$ es muy negativo puede haber peligro de cavitación.
- La LP en un depósito abierto es igual a la cota a que se encuentra el nivel del agua en el mismo, pues la presión en la superficie del agua es la atmosférica ($\frac{P}{\gamma} = 0$).
- Para determinar la LP o línea de carga hay que aplicar la ecuación de Bernouilli entre el punto de origen y el final, resolviendo el problema globalmente para después reparar en las pérdidas de carga particulares de cada elemento concreto.



6. CÁLCULO DE LA LÍNEA PIEZOMÉTRICA

El estudio del sistema de bombeo para la EDARU que vamos a hacer se basa en el estudio de la línea piezométrica. Vamos a partir de una estación que sirva para depurar el agua de un municipio de alrededor de 50000 habitantes y unas características que se detallan en la siguiente tabla:

Datos de partida	
Población	50000 habitantes
Dotación	250 l/hab día
Coeficiente Qmax	1,720
Concentración SS entrada	375 mg/l
Concentración DBO entrada	400 mg/l
Concentración SS salida	30mg/l
Concentración DBO salida	23mg/l

Datos de partida del estudio. Fuente: Empresa municipal de aguas y saneamiento de Murcia.

Se hace muy necesario este estudio para conseguir el primer objetivo, que no es otro que lograr que la línea de agua pueda mantener una presión por gravedad. En este estudio tomaremos como datos el caso más desfavorable, que es aquel en el que el caudal sea el máximo posible.

El cálculo se centra fundamentalmente en los puntos donde se producen pérdidas de carga, esto es en los distintos equipos de la planta y en los elementos de conexión, como pueden ser las tuberías.

La finalidad de este estudio es conseguir contrarrestar las posibles pérdidas de carga de la línea mediante el diseño de un sistema de bombeo que sea capaz de proporcionar suficiente presión por gravedad. Por otro lado, éstas bombas han de ser capaces también de dotar al fluido una velocidad superior a 0,3 m/s para evitar que los sólidos arrastrados se depositen a lo largo de las tuberías.

Para que los procesos sean homogéneos, es importante que las líneas de la estación tengan el mismo caudal. Según CEDEX, el número de líneas de tratamiento varía de la siguiente manera:



Recomendaciones del CEDEX para establecer el número de líneas de tratamiento				
Carácter de estacionalidad	Población de diseño en habitantes equivalentes			
	< 10000	10000 - 20000	20000 - 50000	> 50000
Población estable	1 línea	1 línea	2 líneas iguales	> 2 líneas iguales
Población estacional	1 línea	2 líneas iguales	2 líneas iguales	> 3 líneas iguales

Número de líneas en función de la población. Fuente propia.

En este caso, al ser una EDARU para una población en torno a 50000 habitantes, se necesitan 2 líneas iguales.

6.1 CÁLCULOS HIDRÁULICOS

Número de líneas: 2

Vamos a establecer como dato de partida que la velocidad del fluido del diseño sea 1m/s para que sea holgadamente superior a los 0,3m/s mínimos para evitar que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo.

6.1.1 Pérdida de carga en equipos.

Tamiz

Caudal de diseño	417 m ³ /h
Qmax	718 m ³ /h
Número de líneas	2
Caudal maximo por línea	359 m ³ /h

Tabla caudales de diseño. Fuente propia

$$h_i = \frac{1}{C \cdot 2g} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2$$



H_i : pérdida de carga (m).

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

Q : caudal (m^3/s)

A : área sumergida del tamiz $\rightarrow A=0,25m^2$ (área sumergida estimada).

C : coeficiente adimensional del tamiz = 0,6

$$h_i = \frac{1}{C \cdot 2g} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \rightarrow \frac{1}{0,6 \cdot 2 \cdot 9,8} \cdot \left(\frac{0,1}{0,25}\right)^2 = 0,013m$$

Desarenador

Caudal de diseño	$417 m^3/h$
Q_{max}	$718 m^3/h$
Número de líneas	2
Caudal maximo por línea	$359 m^3/h$

Tabla caudales de diseño. Fuente propia

Salida por vertedero frontal $Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2}$

Q : caudal unitario de cada diente (Q_{max}).

H : altura de la lámina de agua aguas arriba (m)

L : longitud del vertedero $\rightarrow 1,8m$

$$Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2} \rightarrow h = \left(\frac{Q}{1,9 \cdot L}\right)^{2/3} \rightarrow \left(\frac{0,1}{1,9 \cdot 1,8}\right)^{2/3} = 0,095m$$

Se tiene en cuenta un resguardo de 0,2 m en el vertedero. Total: $0,095+0,2=0.295m$

Pérdidas internas tabuladas desarenador: 0,45m.

Total pérdidas desarenador: 0,745m.



Arqueta de reparto

Vertedero frontal $Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2}$

Q: caudal unitario de cada diente (Q máx.)

h: altura de la lamina de agua aguas arriba (m)

L: longitud vertedero $\rightarrow 0,6\text{m}$

$$Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2} \rightarrow h = \left(\frac{Q}{1,9 \cdot L} \right)^{2/3} \rightarrow \left(\frac{0,1}{1,9 \cdot 0,6} \right)^{2/3} = 0,197\text{m}$$

Resguardo de 0,2m.

Total pérdidas arqueta de reparto = 0,2+0,197 = 0,397m

Reactor biológico

El caudal instantáneo horario debe ser superior al doble del caudal medio horario de diseño del resto de la planta en cuanto al tratamiento biológico se refiere.

Vertedero triangular Thompson (dientes a 90°): $Q = 1,84 \cdot L \cdot h^{3/2}$

Q: caudal unitario de cada diente (Qmax)

h: altura de la lámina de agua aguas arriba

L: longitud del vertedero $\rightarrow 6\text{m}$

Caudal de diseño	$417 \text{ m}^3/\text{h}$
Qmax	$718 \text{ m}^3/\text{h}$
Número de líneas	2
Caudal maximo por línea	$359 \text{ m}^3/\text{h}$

Tabla caudales de diseño. Fuente propia



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

$$Q = 1,84 \cdot L \cdot h^{3/2} \rightarrow h = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{2/3} \rightarrow \left(\frac{0,1}{1,84 \cdot 6} \right)^{2/3} = 0,043m$$

Resguardo de 0,2m

Total pérdidas reactor biológico = 0,2+0,043 = 0,243m

Pérdida interna decantador primario: 0,45m

Total pérdidas decantación primaria = 0,243+0,45 = 0,693m

Decantador secundario

Vertedero triangular Thompson (dientes a 90°): $Q = 1,84 \cdot L \cdot h^{3/2}$

Q: caudal unitario de cada diente (Qmax)

h: altura de la lámina de agua aguas arriba

L: longitud del vertedero → 13m

Caudal de diseño	417 m ³ /h
Qmax	718 m ³ /h
Número de líneas	2
Caudal maximo por línea	359 m ³ /h

Tabla caudales de diseño. Fuente propia

$$Q = 1,84 \cdot L \cdot h^{3/2} \rightarrow h = \left(\frac{Q}{1,84 \cdot L} \right)^{2/3} \rightarrow \left(\frac{0,1}{1,84 \cdot 13} \right)^{2/3} = 0,025m$$

Resguardo de 0,2m

Total = 0,2+0,027 = 0,227m

Pérdidas internas decantación secundaria: 0.45m

Total pérdidas decantación secundaria = 0,227+0,45 = 0,677m



Cloración

$$\text{Vertedero frontal } Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2}$$

Q: caudal unitario de cada diente (Qmax)

h: altura de la lámina de agua aguas arriba

L: longitud del vertedero $\rightarrow 0,5\text{m}$

$$Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2} \rightarrow h = \left(\frac{Q}{1,9 \cdot L} \right)^{2/3} \rightarrow \left(\frac{0,1}{1,9 \cdot 0,5} \right)^{2/3} = 0,222\text{m}$$

Resguardo de 0,2m

$$\text{Total} = 0,2 + 0,222 = 0,422\text{m}$$

Pérdida interna de ciclo de cloración: 0,45m

$$\text{Total pérdidas cloración} = 0,422 + 0,45 = 0,872\text{m}$$

Arqueta de salida

$$\text{Vertedero frontal } Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2}$$

Q: caudal unitario de cada diente (Qmax)

h: altura de la lámina de agua aguas arriba

L: longitud del vertedero $\rightarrow 1,4\text{m}$

Caudal de diseño	$417 \text{ m}^3/\text{h}$
Qmax	$718 \text{ m}^3/\text{h}$

Tabla caudales de diseño. Fuente propia.



$$Q = 1,9 \cdot L \cdot h^{3/2} \rightarrow h = \left(\frac{Q}{1,9 \cdot L} \right)^{2/3} \rightarrow \left(\frac{0,2}{1,9 \cdot 1,4} \right)^{2/3} = 0,178m$$

Pérdidas en equipos	
Equipo	Pérdida de carga(m)
Tamices	0,013
Desarenador	0,095
Arqueta de reparto	0,397
Reactor biológico	0,693
Decantador secundario	0,677
Cloración	0,872
Arqueta de salida	0,178
Total pérdidas	2,925

Resumen pérdidas en equipos. Fuente propia.

6.1.2 Pérdidas en conductos y tuberías.

En este apartado calculamos las pérdidas de carga que se producen en las tuberías así como las que se producen en los accesorios.

Pérdida de carga en las tuberías. Fórmula de Colebrook.

Aplicamos la siguiente fórmula:

$$V = -2 \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t} \cdot \log \left(\frac{K}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot n}{D \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t}} \right)$$

Pérdida de carga en los accesorios. Fórmulas del Metalf-Eddy

Aplicamos la siguiente fórmula:

$$h_t = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$



El valor de K lo obtenemos de la siguiente tabla obtenida del Metalf-Eddy.

Accidente	K
Contracción brusca	0,5-1,5
Expansión brusca	0,5-1,1
Codos a 45°	0,15-0,19
Codos a 90°	0,26-0,33
Válvula de compuerta	0,15-0,3
Válvula de retención	1,5-2,9
Compuerta canal abierto	0,2-0,3

Tabla coeficiente resistencia. Fuente:

http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/C%C3%A1lculos_hidr%C3%A1ulicos

h_t : pérdida de carga.

v : velocidad media del fluido en la tubería.

K : rugosidad absoluta.

n : viscosidad cinemática. $n = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para una temperatura del agua de 20°C.

D : diámetro de la tubería.

g : gravedad.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t} \cdot \log \left(\frac{K}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot n}{D \cdot \sqrt{2g \cdot D \cdot h_t}} \right)$$

λ : coeficiente que debemos obtener. Para ello debemos conocer el número de Reynolds y la rugosidad relativa:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Una vez obtenido el valor de λ podemos obtener las pérdidas por metro de cada tubería.

$$j = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$



Pozo de bombeo

Para calcular el Re debemos primero calcular la velocidad.

$$V = \frac{4 \cdot Q_{línea}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 359 \cdot \frac{1}{3600}}{\pi \cdot 0,35^2} = 1,036 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1,036 \cdot 0,35}{1 \cdot 10^{-6}} = 2,66 \cdot 10^5$$

Una vez tenemos el número de Reynolds calculamos λ entrando en el diagrama de Moody, para ello calculamos $\frac{k}{d} = \frac{0,0015}{350} = 0,0000043$.

Según el diagrama, $\lambda = 0,011$.

Calculamos ahora la pérdida de carga por metro en la tubería.

$$j = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{0,011}{0,35} \cdot \frac{1,036^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0017$$

Pérdida de carga en los accesorios:

$$\text{Válvula de retorno (K=2): } h_a = 2 \cdot \frac{1,036^2}{2 \cdot 9,81} = 0,11 \text{ m}$$

$$\text{Codo } 45^\circ \text{ (K=0,19) (2 unidades): } h_a = 2 \cdot 0,19 \cdot \frac{1,036^2}{2 \cdot 9,81} = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{Longitud tramo recto 4m} = 4 \cdot 0,0017 = 0,007 \text{ m}$$

$$\underline{h_{total} = 0,11 + 0,02 + 0,007 = 0,137}$$

Desarenador y arqueta de reparto

$$\text{Codo } 45^\circ \text{ (K=0,19) (3 unidades): } h_a = 3 \cdot 0,19 \cdot \frac{1,036^2}{2 \cdot 9,81} = 0,03 \text{ m}$$

$$\text{Contracción brusca (K=0,5): } h_a = 0,5 \cdot \frac{1,036^2}{2 \cdot 9,81} = 0,027 \text{ m}$$

$$\text{Longitud tramo recto 4m} = 4 \cdot 0,0017 = 0,007 \text{ m}$$

$$\underline{h_{total} = 0,03 + 0,027 + 0,007 = 0,064 \text{ m}}$$



Enlace arqueta de reparto con reactor biológico

Válvula de compuerta abierta ($K=0,2$): $h_a = 0,01m$

Válvula de retorno ($K=0,3$): $h_a = 0,015m$

Longitud tramo recto 20m = $20 \cdot 0,0017m = 0,034m$

Contracción brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

Codo 45° ($K=0,19$) (6 unidades): $h_a = 0,06m$

Expansión brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

$$\underline{h_{total} = 0,01 + 0,015 + 0,034 + 0,027 + 0,06 + 0,027 = 0,173m}$$

Recirculación reactor biológico

Válvula de retorno ($K=0,3$): $h_a = 0,015m$

Codo 45° ($K=0,19$) (5 unidades): $h_a = 0,05m$

Longitud tramo recto 60m = $60 \cdot 0,0017m = 0,102m$

$$\underline{h_{total} = 0,015 + 0,05 + 0,102 = 0,167m}$$

Enlace reactor biológico – decantador secundario

Válvula de retorno ($K=0,3$): $h_a = 0,015m$

Codo 45° ($K=0,19$) (6 unidades): $h_a = 0,06m$

Longitud tramo recto 10m = $10 \cdot 0,0017m = 0,017m$

Expansión brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

Contracción brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

$$\underline{h_{total} = 0,015 + 0,06 + 0,017 + 0,027 + 0,027 = 0,146m}$$



Enlace decantador secundario – cloración

Válvula de retorno ($K=0,3$): $h_a = 0,015m$

Longitud tramo recto 4m = $4 \cdot 0,0017m = 0,007m$

Expansión brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

Contracción brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

$h_{total} = 0,007 + 0,027 + 0,027 = 0,061m$

Cloración – Vertido de salida

Longitud tramo recto 16m = $16 \cdot 0,0017m = 0,027m$

Expansión brusca ($K=0,5$): $h_a = 0,027m$

Salida abierta ($K=0,25$): $h_a = 0,014m$

$h_{total} = 0,014 + 0,027 + 0,027 = 0,068m$

Pérdidas en accesorios, tuberías y accidentes	
Tramo	Pérdidas de carga (m)
Pozo de bombeo	0,137
Desarenador	0,064
Enlace arqueta reparto - reactor biológico	0,173
Recirculación reactor biológico	0,167
Enlace reactor biológico - decantador secundario	0,146
Enlace decantador secundario - cloración	0,061
Enlace cloración - arqueta de salida	0,068
Total pérdidas	0,816

Tabla resumen pérdida de carga en accesorios. Fuente propia.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

Podemos concluir diciendo que el total de pérdidas es $2,925 + 0,816 = 3,741$ m



ANEXO 1: CÁLCULO BOMBEO



ANEXO 1: CÁLCULO BOMBEO

En este anexo calcularemos el dimensionamiento del sistema de bombeo en cabecero de planta y en recirculación.

1. Cálculo del pozo de bombeo

El pozo de bombeo es el lugar donde se recogen las aguas residuales y donde se encuentran las bombas.

- Volumen mínimo del pozo:

$$V = \frac{0,9 \cdot Q}{Z}$$

V = volumen del pozo

Q = caudal de bombeo máximo (l/s)

Z = número de arranques.

- Sumergencia de aspiración

$$V = \frac{4 \cdot Q_{bombeo}}{\pi \cdot D^2}$$

V = velocidad (m/s)

Q = caudal de bombeo máximo (l/s)

D = diámetro de la tubería de impulsión

H = altura de sumergencia = $H = \frac{v^2}{2g} + 0,20$ margen de seguridad



- Diámetro del pozo

$$S_{min} = \frac{V_{min}}{H_t}$$

S_{min} = Superficie mínima del pozo (m^2)

V_{min} = Volumen mínimo del pozo (m^3)

H_t = altura mínima de la lámina del agua (m)

2. Pozo bombeo cabecera de planta

La función de este pozo es albergar el agua residual para ser posteriormente impulsada hacia una cota suficientemente alta para que fluya por gravedad al resto de los equipos.

$$Q = 718 \frac{m^3}{h} \rightarrow 199,4 \text{ l/s}$$

- Volumen mínimo del pozo

Se calcula que el número máximo de arranques debe ser de 8 por hora para evitar el deterioro de los motores que accionan las bombas por calentamiento.

$$V = \frac{0,9 \cdot Q}{Z} = \frac{0,9 \cdot 199,4}{8} = 22,43 \text{ m}^3$$

- Sumergencia de aspiración

$$\text{Caudal de bombeo} = 718 \frac{m^3}{h}$$

Diámetro estimado de la tubería de impulsión = 200mm



$$V = \frac{4 \cdot Q_{\text{bombeo}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot \frac{718}{4 \text{ bombas}} \cdot \frac{1}{3600}}{\pi \cdot 0,20^2} = 1,59 \text{ m/s}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} + 0,20 = \frac{1,59^2}{2 \cdot 9,81} + 0,20 = 0,33 \text{ m}$$

Se toma una altura entre parada-arranque de seguridad de 0,9m

Altura mínima del pozo: 1,23m

- Diámetro del pozo

Superficie mínima del pozo:

$$S_{\text{min}} = \frac{V_{\text{min}}}{H_t} = \frac{22,43}{1,23} = 18,235 \text{ m}^2$$

- Elección del equipo de bombeo:

Caudales para el diseño	
Qmed	10000 m ³ /h
Qmed horario	417 m ³ /h
Qmin	209 m ³ /h
Qmax	718 m ³ /h

Tabla caudales de diseño. Fuente propia



SUBMERSIBLE SEWAGE PUMPS

DML-DMLV

TECHNICAL DATA : MOTOR

50 Hz

	Output	kW		2,2	3,7		5,5		7,5		11		15		22	
	Phase	3														
	Poles	4														
	Insulation Class	F														
Full Load	Voltage	[V]	400	400	690	400	690	400	690	400	690	400	690	400	690	
	Current	[A]	5,2	8,4	4,8	12,6	7,3	16,9	9,8	23,8	13,7	31	17,9	42	24,2	
	Efficiency	%	69,5	72,7		74,5		79		77,4		80,2		86,5		
	Power factor	%	87,6	87,4		84,3		80,9		85,6		86,6		87,3		
Locked Rotor Torque			%	204	226	-	252	-	256	-	170	-	196	-	172	-
Start Current			[A]	25,7	48,1	-	82,6	-	116,5	-	136	-	211,9	-	318,5	-
N° starts per hour			20													
Voltage Tolerance			±10%													
Frequency Tolerance			±5%													
GD ²			[kgxm ²]	0,020	0,030		0,059		0,076		0,120		0,160		0,340	

Tabla de datos del motor de las bombas. Fuente EBARA, 2014

Para el bombeo de cabecera se utiliza en concreto el modelo DML de esta marca. Cuenta con impulsor monocanal específico para el impulso del bombeo de aguas residuales. El motivo de la elección es que la altura manométrica que es capaz de elevar, se asemeja a la altura calculada en la línea piezométrica. La manera de instalarlas es poniendo 4 unidades en paralelo y siempre manteniendo una de reserva. Las bombas son centrífugas sumergibles con unos valores nominales de $270 \text{ m}^3/\text{h}$ y 5,4 m de impulsión que son los necesarios para, según lo obtenido en la línea piezométrica, elevar el agua bruta, que son de $718 \text{ m}^3/\text{h}$ y de 3,741 m.

En el peor de los casos, a caudal máximo, podrían trabajar 3 bombas únicamente, ya que son capaces de elevar $810 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ aunque su rendimiento no sería el óptimo en función de la curva de funcionamiento que se muestra a continuación. En la siguiente tabla podemos ver la mejor conexión posible de bombas en función del número de éstas que haya conectadas.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

	Qmax (718 m ³ /h)		Qmed (417 m ³ /h)		Qmin (209 m ³ /h)	
Bombas conectadas	Q por bomba (m ³ /h)	η (%)	Q por bomba (m ³ /h)	η (%)	Q por bomba (m ³ /h)	η (%)
2 bombas	359	0	208,5	62	104,5	65
3 bombas	239	62,5	139	67	69,66	55
4 bombas	179,5	67	104,25	64	52,25	0

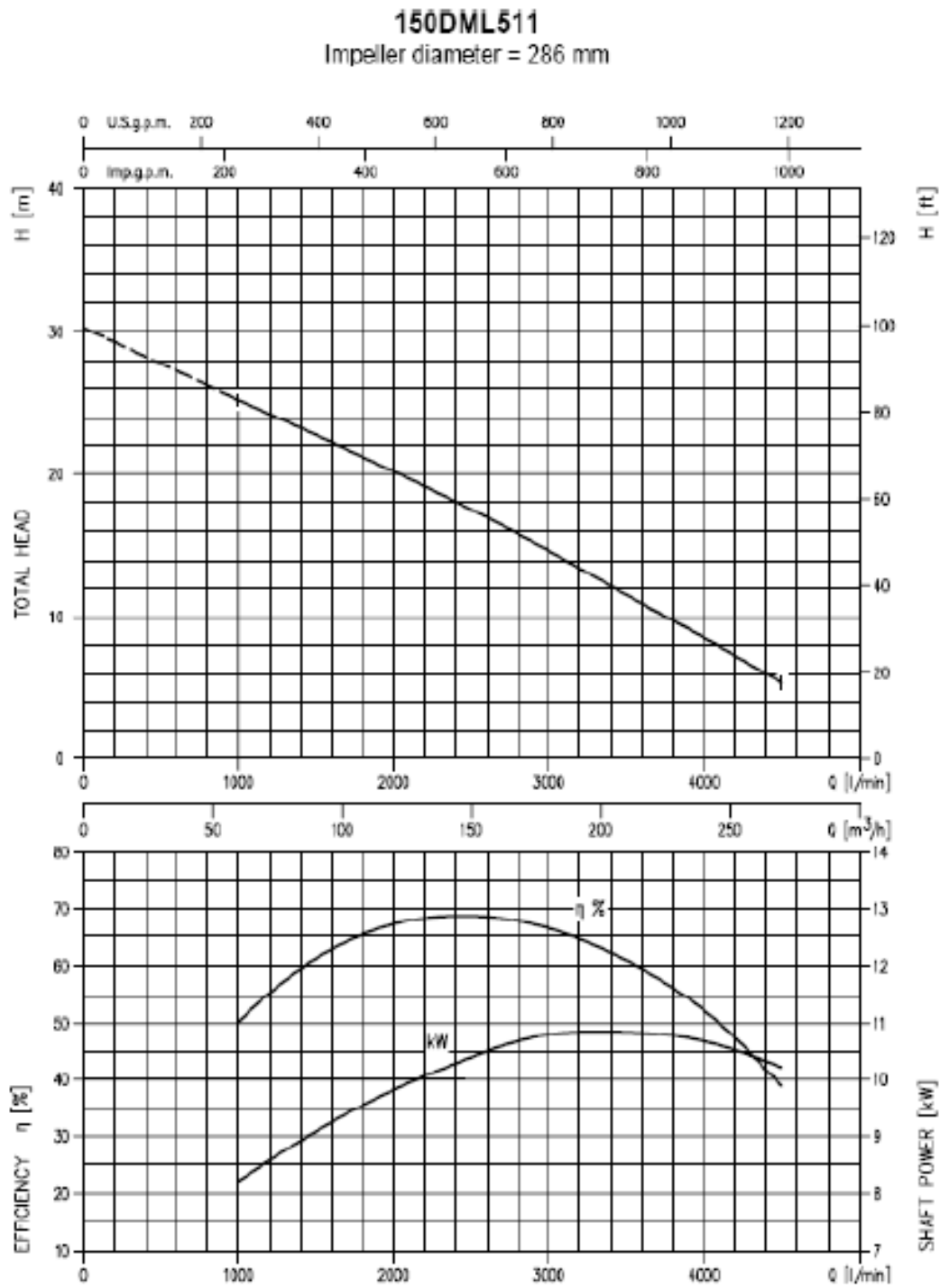
Número de bombas en función del caudal. Fuente EBARA, 2014

En la tabla podemos observar que para trabajar con caudal máximo lo mejor es utilizar 4 bombas. Por otra parte, para el funcionamiento a caudal medio y caudal mínimo es recomendable el uso de 3 y 2 bombas respectivamente.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

La curva de funcionamiento es la siguiente:



Curva de funcionamiento de las bombas. Fuente EBARA, 2014



3. Pozo bombeo recirculación

$$Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s} = 359 \text{ m}^3/\text{h} = 99,7 \text{ l/s}$$

H = altura útil de bombeo = diferencia de cotas salida-entrada reactor biológico + pérdida de carga tubería recirculación interna → Por seguridad tomaremos 2,5m para garantizarnos que se cumple.

- Volumen mínimo del pozo

$$V = \frac{0,9 \cdot Q}{Z} = \frac{0,9 \cdot 99,7}{8} = 11,21 \text{ m}^3$$

- Sumergencia de aspiración

$$\text{Caudal de bombeo} = 718 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Diámetro estimado de la tubería de impulsión = 150mm

$$V = \frac{4 \cdot Q_{\text{bombeo}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot \frac{359}{4 \text{ bombas}} \cdot \frac{1}{3600}}{\pi \cdot 0,15^2} = 1,41 \text{ m/s}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} + 0,20 = \frac{0,35^2}{2 \cdot 9,81} + 0,20 = 0,30 \text{ m}$$

Se toma una altura entre parada-arranque de seguridad de 0,9m

Altura mínima del pozo: 1,20m

- Diámetro del pozo

Superficie mínima del pozo:

$$S_{\min} = \frac{V_{\min}}{H_t} = \frac{11,21}{1,20} = 9,26 \text{ m}^2$$



- Elección del equipo de bombeo

Caudales para el diseño	
Qmed	10000 m^3/h
Qmed horario	209 m^3/h
Qmin	105 m^3/h
Qmax	359 m^3/h

Tabla caudales de diseño. Fuente propia

Para la impulsión de recirculación se ajusta el modelo de la bomba igual que hemos hecho con el de cabecera, es decir, según la altura necesaria calculada en el tramo de recirculación. En este caso a partir de los datos calculados de $Q_{max} = 359 m^3/s$ y altura de 2,5 metros el fabricante nos aporta dos posibles modelos de bombas a escoger: el modelo 150 DML 57,5 y el modelo 150 DML 55,5.

Elegimos el modelo 150 DML 57,5 ya que según las especificaciones del fabricante, trabajando a caudal medio, una sola bomba es capaz de impulsar los 209 m^3/h requeridos. Para la instalación tomamos 3 bombas sumergibles de este modelo y una de reserva conectadas, igualmente, en paralelo.

En el peor de los casos, a caudal máximo, podrían trabajar sólo dos bombas que serían capaces de elevar el agua a 480 m^3/h aunque su rendimiento no sería el óptimo en función de la curva de funcionamiento que se muestra a continuación. En la siguiente tabla podemos ver la mejor conexión posible de bombas en función del número de éstas que haya conectadas.

	Qmax (718 m^3/h)		Qmed (417 m^3/h)		Qmin (209 m^3/h)	
Bombas conectadas	Q por bomba (m^3/h)	η (%)	Q por bomba (m^3/h)	η (%)	Q por bomba (m^3/h)	η (%)
1 bomba	359	0	209	58	105	70
2 bombas	179,5	65	104,5	69	52,5	0
3 bombas	120	71	69,66	67	35	0

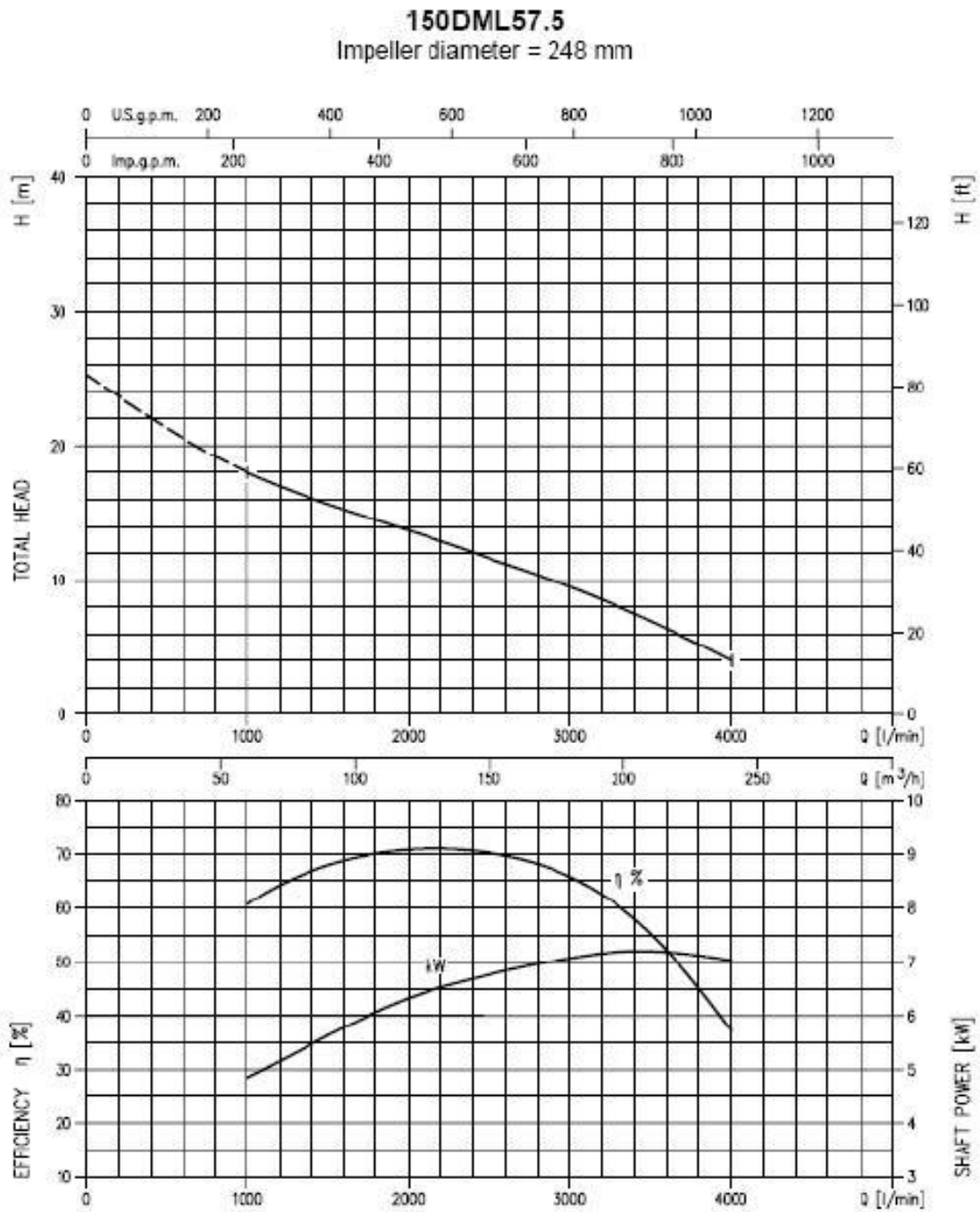
Número de bombas en función del caudal. Fuente EBARA, 2014

Como podemos ver en la tabla, para trabajar a caudal máximo es mejor la conexión con 3 bombas, para el caudal medio 2 bombas y para el caudal mínimo tan solo una bomba es necesaria.



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

La curva de funcionamiento es la siguiente:



Curva de funcionamiento de las bombas. Fuente EBARA



ANEXO 2: CÁLCULOS ELÉCTRICOS



ANEXO 2: CÁLCULOS ELÉCTRICOS

El sistema de control de las bombas estará situado en un local llamado centro de control de motores (CCM). Dichos locales estarán en lugar diferente de donde están los equipos que controla.

1. Cuadro eléctrico

Los cuadros deben cumplir las siguientes especificaciones y requisitos técnicos según EMUASA:

- No está permitido el uso de cuadros o armarios de chapa por el riesgo que conlleva la conducción eléctrica. Se recomienda que éstos sean de poliéster o cualquier otro material aislante.
- Cada uno de los cuadros deberá estar correctamente identificado y en su interior vendrá especificada la potencia e intensidad consumida por cada equipo.
- Los dispositivos que van en cada cuadro contendrán partes activas protegidas y los cables del cuadro estarán también identificados.

Los cuadros estarán constituidos por los siguientes componentes:

- Caja de material aislante.
- Contactores.
- Selectores (manual-0-automático)
- Diferentes pilotos de alarma.

Además de estos que han sido suministrados por el proveedor hay que añadir los siguientes:

- Cuenta horas por cada bomba.
- Arrancador estrella-triángulo.
- Protección para cada bomba.

2. Arrancador

El arrancador del tipo estrella-triángulo es el más sencillo y económico para arrancar los motores. Se basa en arrancar en configuración de estrella y posteriormente cuando se haya alcanzado el 80% de la velocidad del motor, se cambia a configuración en triángulo.



El uso del arrancador es bastante común y a partir de 0,75 kW el reglamento exige que los motores eléctricos estén dotados de sistemas de arranque. La configuración estrella-triángulo reduce en 1/3 la intensidad de arranque de los motores de las bombas.

El sistema arrancador estrella-triángulo lo suministrará el fabricante del equipo.

3. Protecciones

Cada equipo debe tener una protección individual para estar protegidos frente a posibles sobretensiones. Además, estas protecciones deben ser independientes entre cada una de las bombas para evitar que si una resulta dañada, se quede sin servicio toda la estación.

Se usan dos tipos de protecciones por bomba y además el relé térmico y el interruptor magnetotérmico.

Tipos de protecciones:

- Protección curva electromagnética: Son aquellas que reaccionan frente a intensidades de alto valor, como las que encontramos al arrancar un motor eléctrico. Este sistema debe proteger que esa intensidad no sea excesiva.
- Protección curva térmica: Son aquellas que actúan frente a sobrecargas. Estas protecciones simulan el calentamiento y enfriamiento del motor protegido en base a sus constantes de tiempo.

El interruptor magnetotérmico protege frente a sobrecorrientes y sobrecargas mientras que el relé protege frente a los picos de intensidad producidos al arrancar el motor y también detecta posibles faltas de tensión. El magnetotérmico es el aparato que agrupa los dos tipos de protecciones y tienen tres tipos de desconexión: la manual, la magnética y la térmica.



www.solostocks.com

La intensidad de cálculo para la elección del magnetotérmico adecuado será menor o igual a la intensidad nominal, y ésta a su vez será menor o igual que la máxima admisible del equipo a proteger.

$$I_c \leq I_n \leq I_{adm}$$

El poder de corte en caso de sufrir una sobrecarga debe ser normalizado y el magnetotérmico debe tener un poder de corte superior a la máxima corriente de cortocircuito que puede pasar por él para asegurarnos de que se funde antes de destruirse.

4. Cálculo de los conductores y el neutro

El sistema que proporciona la corriente al sistema de bombeo es un sistema trifásico de 380 V. El cableado que conecta el cuadro de control con las bombas debe cumplir unos requisitos: Primero determinaremos los cables necesarios al centro de control de motores (CCM) en cabecera de planta y posteriormente los que son necesarios para el funcionamiento de cada bomba.

Hay que tener en cuenta la intensidad admisible y la caída de tensión.

El cálculo de la intensidad máxima admisible en líneas trifásicas se hace mediante la fórmula:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

P: potencia suministrada (W)

U: tensión en trifásica = 380 V

Cosφ: factor de potencia = 0,85 (estimación).

La sección mínima de los cables de neutro y de fase será de 6mm^2 .

5. Instalación eléctrica bombeo de cabecera

Las bombas que hemos instalado en cabecera de planta corresponden a 11 kW y 15 cv cada una. La conexión de cada una es trifásica a 380 V y la intensidad absorbida por bomba es de 23,8 A.

La potencia total de los equipos de bombeo es de $4 \times 11 \text{ kW} = 44 \text{ kW}$.

Los cuadros de control también son suministrados por el fabricante de las bombas. Optamos por instalar 2 cuadros que controlan 2 bombas cada uno más uno adicional para la bomba que tenemos de reserva. Cada uno de ellos tiene un conmutador para seleccionar si necesitamos una bomba o las dos. Las funciones se podrán regular de forma automática o manual con un selector con las posiciones manual-0-automático.



Cuadros de control para las bombas. Fuente EBARA.



Protecciones

Magnetotérmico

Si cada bomba tiene una intensidad máxima admisible de 23,8 A y siguiendo la fórmula: $I_c \leq I_n \leq I_{adm}$ tomamos como $I_n = 20$ A.

Bajo estas condiciones elegimos el magnetotérmico C 20A, 4P, 10kA ya que con 10 kA nos aseguramos que no se sobrepase el poder de corte.

Relé térmico

El relé viene proporcionado por el fabricante e incorporado a la bomba.

Sección de cable de la línea individual de las bombas de cabecera

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 18,67 \text{ A}$$

Para la instalación se escoge el cable multiconductor trifásico con recubrimiento de XLPE (polietileno reticulado) según norma ITC-BT-19 y se elige el mínimo de 6mm^2 , ya que es capaz de soportar 44 A, suficientes para la I_{adm} que dice el fabricante de 23,8 A.

Por otro lado, la sección mínima del cable que debe llegar al CCM en el caso de que sólo controle las bombas y teniendo en cuenta que hay 4 con un consumo de 44 kW:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi} = \frac{44000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 78,64 \text{ A}$$

En este caso, los cables vendrán de la acometida, por lo tanto serán subterráneos y nos fijaremos en la norma ITC-BT-07. Al valor de la intensidad deberemos por tanto aplicarle el factor de corrección para agrupaciones de cables trifásicos. Según la norma ITC-BT-07, el valor de este factor es 0,75, por lo tanto la nueva intensidad máxima admisible será $\frac{78,64}{0,75} = 104,5 \text{ A}$. En este caso se escoge la sección de 25mm^2 que es capaz de soportar 125 A.



6. Instalación eléctrica bombeo recirculación

Las bombas que hemos instalado en cabecera de planta corresponden a 7,5 kW y 10 cv cada una. La conexión de cada una es trifásica a 380 V y la intensidad absorbida por bomba es de 16,9 A.

La potencia total de los equipos de bombeo es de $3 \times 7,5 \text{ kW} = 22,5 \text{ kW}$.

Los cuadros de control también son suministrados por el fabricante de las bombas. Optamos por instalar 1 cuadro que controla 2 bombas más uno adicional para la bomba que tenemos de reserva. Cada uno de ellos tiene un conmutador para seleccionar si necesitamos una bomba o las dos. Las funciones se podrán regular de forma automática o manual con un selector con las posiciones manual-0-automático.

Protecciones

Si cada bomba tiene una intensidad máxima admisible de 16,9 A y siguiendo la fórmula: $I_c \leq I_n \leq I_{adm}$ tomamos como $I_n = 16 \text{ A}$.

Bajo estas condiciones elegimos el magnetotérmico C 16A, 4P, 10kA.

Sección de cable de la línea individual de las bombas de cabecera

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{7500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 13,40 \text{ A}$$

Para la instalación se escoge el cable multiconductor trifásico con recubrimiento de XLPE (polietileno reticulado) según norma ITC-BT-19 y se elige el mínimo de 6 mm^2 , ya que es capaz de soportar 44 A, suficientes para la I_{adm} que dice el fabricante de 16,9 A.

Por otro lado, la sección mínima del cable que debe llegar al CCM en el caso de que sólo controle las bombas y teniendo en cuenta que hay 3 con un consumo de 22,5 kW:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{22500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 40,22 \text{ A}$$



Cálculo de la línea piezométrica de una EDARU

En este caso, los cables vendrán de la acometida, por lo tanto serán subterráneos y nos fijaremos en la norma ITC-BT-07. Al valor de la intensidad deberemos por tanto aplicarle el factor de corrección para agrupaciones de cables trifásicos. Según la norma ITC-BT-07, el valor de este factor es 0,75, por lo tanto la nueva intensidad máxima admisible será $\frac{40,22}{0,75} = 53,6 \text{ A}$. En este caso se escoge la sección de 10mm^2 que es capaz de soportar los requisitos mínimos.



ANEXO 3: CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

En relación a los objetivos que nos hemos marcado al comienzo de este proyecto podemos decir que hemos sido capaces de cumplirlos. Hemos podido calcular la línea piezométrica de nuestra EDARU resolviendo el problema propuesto con unos datos de partida conocidos.

De nuestro estudio de la línea piezométrica podemos sacar algunas conclusiones sobre las pérdidas de carga.

Pérdidas de carga en equipos: Podemos ver en los cálculos que hemos realizado, que en los lugares donde más pérdida de carga se produce es en la cloración, en el decantador secundario y en el reactor biológico. Sin embargo, en los tamices, en el desarenador y en la arqueta de salida es en donde menos pérdidas encontramos.

Pérdidas de carga en conductos y tuberías: Lo primero que podemos decir acerca de este tipo de pérdidas es que son menores en cuanto a su valor cuantitativo que las producidas en los equipos. El valor más alto lo encontramos en la recirculación al reactor biológico y en los enlaces arqueta de reparto-reactor biológico y reactor biológico-decantador secundario. En los enlaces decantador secundario-cloración y cloración-arqueta de salida, así como en el desarenador las pérdidas de carga que se producen son muy pequeñas.

Podemos decir también que hemos logrado diseñar un sistema de bombeo para nuestra EDARU capaz de dotar al agua residual de una cota suficiente para salvar los problemas que suponen las pérdidas de carga. Hemos encontrado unas bombas concretas con unas características y especificaciones técnicas conocidas que nos han permitido realizar todos los cálculos del diseño con precisión y elegir en cada caso el número de bombas que necesitamos para lograr mejores prestaciones.

Hemos estudiado también el consumo eléctrico, así como los componentes electrónicos que nos hacen falta para la instalación y el funcionamiento de nuestro sistema de bombeo de la planta, dando unos cálculos y unas especificaciones de los materiales concretos.



ANEXO 4: BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

- 1) Metcalf & Eddy, "Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización" (Mc. Graw-Hill, 1996).
- 2) Hernández Muñoz, A., Hernández Lehmann, A., Galán Martínez, P., "Manual de depuración Uralita" (Editorial Paraninfo, 2004).
- 3) Sainz Sastre, J. A., "Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales" (Fundación EOI, 2007).
- 4) Agua y más cosas. [consulta 12-8-2014]. Disponible en:
<http://aguaymascosas.blogspot.com.es/2012/02/3-depuracion-de-aguas-residuales.html>
- 5) Sistema genérico de saneamiento. [consulta 2-9-2014]. Disponible en:
<http://www.consorticioaa.com/cmscaa/opencms/CAA/saneamiento/sistema-generico-de-saneamiento/depuracion-edar/decantacion-primaria.htm>
- 6) Cálculo de instalaciones de bombeo de agua. [consulta 8-7-2014]. Disponible en:
<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html#seccion12>
- 7) DÍAZ Bauluz, Paz. Diseño paramétrico de estación de tratamiento de agua. [consulta 8-7-2014]. Disponible en:
<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4aa7c26986558.pdf>